

КОМБІНОВАНИЙ ПІДХІД ДО ТОЧІСНОЇ АТЕСТАЦІЇ РОБОЧИХ ЗОН ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

Кирилович В.А., Сазонов А.Ю., Самотокін Б.Б., Черепанська І.Ю.

Житомирський державний технологічний університет,

Орлюк Є.І.

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету

Проведено аналіз основних точнісних характеристик та існуючих методів моделювання робочих зон промислових роботів. За результатами аналізу запропоновано комбінований підхід до точнісної атестації робочих зон промислових роботів, перевірена та підтверджена його працездатність. На основі результатів досліджень визначено залежність похибки позиціонування схвата промислового робота від конфігураційного стану ланок його маніпуляційної системи.

Ключові слова: точність позиціонування, похибка позиціонування, позиційна повторюваність, промисловий робот.

Вступ. Незалежно від виду, складності та призначення технологічних структур, в яких реалізуються відповідні технологічні процеси (ТП), включаючи механоскладальні з використанням промислових роботів (ПР), точність є одним із необхідних та найважливіших показників, що враховуються при проектуванні гнучких виробничих комірок (ГВК). В механоскладальних ГВК найбільш поширеним є виконання ПР допоміжних технологічних операцій. Технологічне обслуговування ПР t -ої робочої позиції ($РП_t | t = \overline{1, T}$, де T – загальна кількість РП), а саме завантаження тобто встановлення об'єкта маніпулювання (ОМ) $OM_{t-1}^{d_g}$ в пристосування РП $_t$, розвантаження $OM_t^{d_g}$ d -го виробу їх g -ої групи, характеризуються тим, що саме точність ПР значною мірою визначає техніко-економічні показники технологічної дії на ОМ та отримання виробів в цілому щодо їх якості, продуктивності, вартості тощо. Тому при проектуванні, впровадженні та експлуатації ГВК механоскладання, де реалізуються роботизовані механоскладальні технології (РМСТ), проблема точності є однією із ключових.

Постановка задачі. Основними точнісними характеристиками ПР є *точність позиціонування, позиційна повторюваність, траєкторна точність та траєкторна повторюваність* [1-9].

Для ПР поняття *повторюваність* означає відхилення множини координат характеристичної точки робочого органу ПР, яким є полюс СхПР (P_{Cx}), в процесі здійснення багаторазових повторюваних рухів в одну й ту ж точку робочої зони (РЗ) при однакової конфігурації ланок маніпуляційної системи (МС) ПР [6-8, 10-12].

Точність позиціонування або *статична точність* – зворотна величина похибки і виражає відхилення положення, досягнутого робочим органом ПР, від заданого системою управління ПР значення в певній точці РЗ ПР і визначається як середньоквадратична похибка багаторазового переміщення робочого органу ПР в задану точку РЗ ПР, наприклад, з координатами $P_{c_x}(x_c, y_c, z_c)$.

В тримірному просторі з урахуванням кутових складових розрізняють також *точність орієнтації* або *кутову точність позиціонування*, що вказує на максимальне відхилення фактичного кутового положення СхПР від заданого системою управління ПР.

Позиційна повторюваність виражає близькість між фактичними положеннями характеристичної точки ПР після K -ої кількості повторюваних рухів в одну і ту ж точку в однаковому напрямку з однаковою конфігурацією ланок МС.

В той час, як позиційна повторюваність може сягати значень, менших 0,1 мм, похибка позиціонування, як правило, є набагато більшою та може сягати десятків

міліметрів [13, 14]. При високій точності позиціонування недостатня позиційна повторюваність може негативно впливати на точність виконання технологічних операцій, що особливо важливо при роботизованому складанні, зварюванні, технологічному обслуговуванні металорізальних верстатів (МРВ) тощо [3, 6, 9, 15].

Для виробництв, що вимагають високої точності, особливо важливим є підвищення точності позиціонування та зменшення величини позиційної повторюваності одночасно. Вплив зміни конфігураційного стану ланок МС на точність позиціонування проявляється в тому, що похибка позиціонування ПР в різних точках робочої зони МС ПР може відрізнятись більше, ніж на порядок, перевищуючи при цьому паспорту величину точності [9, 16-20].

Оскільки точність ПР є характеристикою, що обумовлена випадковими процесами та великою кількістю першопричин різної природи, які впливають на положення кінцевої ланки – СхПР в просторі, то доцільно аналізувати «точність» з позицій понять теорії імовірності та статистики [9, 11, 18, 21], приймаючи, що компоненти вектора похибок є випадковими величинами з нульовим математичним очікуванням та відомими ненульовими дисперсіями.

Аналіз відомих моделей сучасних ПР та технічної документації на них, як правило, ускладнюється відсутністю в доступних інформаційних джерелах досить повної інформації про параметри пристроїв керування, датчиків, приводів ланок МС тощо.

Насьогодні існує два основні підходи до аналізу та моделювання точності ПР, а саме: детермінований [1, 4, 24-31] та імовірнісний [4, 6, 7, 9, 15, 17-19, 21, 32-34].

При *детермінованому* методі вважається, що елементарні похибки в зчленуваннях МС ПР викликані похибками приводів МС ПР $\delta_{\text{П}}$, системи керування $\delta_{\text{СК}}$, пружними властивостями МС $\delta_{\text{МС}}$. Для аналізу загальної похибки ПР $\Delta_{\text{ПР}} = \delta_{\text{П}} + \delta_{\text{СК}} + \delta_{\text{МС}}$ приймається абсолютне значення максимально можливої величини похибки в кожному n -му зчленуванні та вказуються переважно у вигляді «поля допуску» $\pm\Delta_{\text{ПР}}$. Недоліками такого підходу є неможливість повною мірою відтворювати випадковість виникнення похибок, а також те, що в різні моменти часу при переміщенні в певну точку робочого простору ПР похибка може приймати не лише абсолютні максимальні значення та накопичуватися на кожному зчленування. Це не дозволяє відтворити випадковість впливу похибок та провести їх статистичний аналіз [35].

Імовірнісний підхід до аналізу похибок має місце в тому випадку, коли інформація про параметри привідної системи ланок МС ПР, масо-інерційні характеристики механічної системи МС ПР та системи керування є недостатньою або відсутньою. При цьому приймається, що елементарні похибки в зчленуваннях МС ПР породжені множиною випадкових впливів різних факторів, а, отже, є випадковими величинами, що розподіляються за певним законом розподілу імовірності з відомими дисперсіями або середніми квадратичними відхиленнями та нульовим математичним очікуванням. Даний підхід дозволяє повною мірою відтворити випадковий характер виникнення похибок та проаналізувати величини похибок в різних точках РЗ ПР не лише з врахуванням максимально накопиченої похибки, а також з врахуванням взаємної компенсації похибок. Вказане вимагає наявності кінематичної моделі МС ПР з врахуванням точнісних характеристик переміщень ланок ПР [1, 10, 11, 25, 32].

Точнісна програмна атестація є інструментом для прогнозування та керування непостійністю інженерних систем [11] і є особливо важливою для систем, які вимагають високої точності. Прикладом останніх можуть бути: системи промислової автоматики, промислові роботи, пристосування робочих позицій (ПрРП) тощо.

Мета дослідження: на підставі змістовної сутності терміну «атестація» щодо його використання для розв'язування задач підвищення точності ПР при технологічному обслуговуванні ПрРП та критичного аналізу існуючих підходів до точнісної програмної атестації робочих зон (РЗ) ПР запропонувати комбінований підхід до точнісної програмної атестації робочих зон ПР, розкрити його сутність, продемонструвати

працездатність, переваги та перспективи використання.

Результати досліджень. Множина факторів, що визначають кінцеву точність позиціонування полюса СхПР, вказує на недоцільність, або повну неможливість використання тільки детермінованих або тільки імовірнісних методів моделювання точнісних параметрів ПР. Для комплексного аналізу похибок ПР запропоновано *комбінований* підхід, що полягає в наступному: складові похибки в зчленуваннях МС ПР, які породжені випадковими факторами різного походження, розглядаються як випадкові величини, що приймають певне випадкове значення із вказаного «поля допуску» та розподіляються в межах цього поля за певним законом розподілу ймовірності. Такий підхід дозволяє провести статистичний аналіз випадкових похибок, визначити закон розподілу та відповідно його параметри: математичне очікування, середнє квадратичне відхилення, кореляційні моменти та коефіцієнти кореляції, що можуть бути використані як кількісні оцінки для подальших досліджень даного напрямку, в тому числі при АС РМСТ на відомому технічному базисі ГВК [30, 36].

Початковими даними комбінованого підходу до моделювання точності позиціонування СхПР є конструктивні параметри ланок МС ПР та УК (кути поворотів навколо осей системи координат ПР (А, В, С) та/або величини лінійних переміщень вздовж відповідних осей системи координат ПР (X, Y, Z)) приводів. В якості збурень, що впливають на кожен ланку МС, виступають елементарні похибки у зчленуваннях, що є випадковими величинами з певним законом розподілу та статистичними характеристиками: математичним очікуванням, середнім квадратичним відхиленням, функцією густини розподілу імовірності, коефіцієнтами кореляції.

За вказаними імовірнісними параметрами доцільно проводити атестацію РЗ ПР для виявлення секторів з різною точністю позиціонування СхПР. Це дозволить прийняти рішення про методи підвищення точності технологічної дії на ОМ, наприклад, при обробці на МРВ, за рахунок оптимізації його розміщення в РЗ ПР, обґрунтувати методи підвищення точності самого ПР або використання вузлів адаптації [33, 37], що можуть компенсувати наявні похибки позиціонування.

Використання комбінованого підходу до розгляду похибок у зчленуваннях полягає в представленні інформації про похибки, що надані компаніями-виробниками, основних вузлів ПР у вигляді статистичних вибірок, що в процесі моделювання приймають вигляд багатомірного масиву даних розмірністю $m \times n \times K$, де K – об'єм вибірки, яка змістовно відображає кількість послідовних переміщень ПР в одну і ту ж саму i -ту точку РЗ ПР. Значення похибки, що наводяться в технічній документації ПР, для процесу моделювання мають представлятись у вигляді інтервалу значень, що означає зміну похибки в межах $\pm \Delta_{j_k}$ в кожному зчленуванні ланок МС ПР випадковим чином з невідомими параметрами розподілу.

Враховуючи випадковий характер прояву похибок позиціонування при моделюванні точнісних характеристик неможливо заздалегідь передбачити їх закон розподілу, проте, багатьма науковцями прийнято вважати, що похибки ПР підпорядковуються нормальному закону розподілу [2, 9, 11, 21, 29].

Найбільш розповсюдженим є представлення точності (похибки позиціонування) однорідними матрицями перетворень [10, 11, 25, 34]. Кожна з являє собою матрицю розмірністю 4×4 , яка перетворює вектор, що виражений в однорідних координатах, із однієї системи координат в іншу. Однорідні матриці перетворень дозволяють виявити геометричний зв'язок між локальною зв'язаною системою координат OUVW n -ої ланки маніпуляційної системи (МС) ПР та СК ПР $OX_{ПР}Y_{ПР}Z_{ПР}$:

$$T_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A & 0 \\ 0 & \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_B = \begin{bmatrix} \cos B & 0 & \sin B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_C = \begin{bmatrix} \cos C & -\sin C & 0 & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(1)

де T_A, T_B, T_C – однорідні матриці повороту навколо осей X, Y, Z відповідно; T_l – матриця лінійних переміщень вздовж осей X, Y, Z; x, y, z – величини лінійних переміщень вздовж відповідних осей X, Y, Z; A, B, C – кут повороту навколо відповідних осей X, Y, Z.

З врахуванням сказаного вище, переміщення n -ої ланки МС ПР відносно $(n-1)$ -ої описується множенням відповідних однорідних матриць перетворення (1) елементарних кутових та лінійних рухів для кожного n -го зчленування.

Таким чином, однорідна матриця T_N^0 для N зчленувань, що визначає положення СК OUVW кожної n -ої ланки відносно абсолютної $OX_{\text{ПР}}Y_{\text{ПР}}Z_{\text{ПР}}$, являє собою добуток послідовності однорідних матриць перетворення (1) для кожного зчленування МС ПР та має вигляд:

$$T_N^0 = \prod_{n=1}^N T_{n-1}^n. \quad (2)$$

Оскільки похибка ПР є величиною векторною та має лінійну і кутову складові, то аналогічно до однорідних матриць перетворення елементарних переміщень (1) формується матриця (3) похибок в зчленуваннях розмірністю 4×4 , що враховує лінійні δ та кутові ε складові похибки n -ої ланки МС при k -му переміщенні Сх в задану точку РЗ ПР:

$$\Delta_{J_{n-1}}^n = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{C_k}^n & \varepsilon_{B_k}^n & \delta_{X_k}^n \\ \varepsilon_{C_k}^n & 1 & -\varepsilon_{A_k}^n & \delta_{Y_k}^n \\ -\varepsilon_{B_k}^n & \varepsilon_{A_k}^n & 1 & \delta_{Z_k}^n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{A_k}^n, \varepsilon_{B_k}^n, \varepsilon_{C_k}^n$ – похибки кутових переміщень навколо осей відповідно $X_{\text{ПР}}, Y_{\text{ПР}}, Z_{\text{ПР}}$; $\delta_{X_k}^n, \delta_{Y_k}^n, \delta_{Z_k}^n$ – похибки лінійних переміщень вздовж відповідних осей.

Координати полюса (P_{C_x}) СхПР в абсолютній системі координат ПР $OX_{\text{ПР}}Y_{\text{ПР}}Z_{\text{ПР}}$ з врахуванням сказаного вище, що підтверджується відповідним виразом в [11], визначається через матричне співвідношення (4), де p_{uvw} – радіус-вектор координат полюса СхПР в локальній зв'язаній системі координат OUVW; T_N^0 – однорідна матриця перетворень, що зв'язує абсолютну систему координат з локальною; p_{xyz} – радіус-вектор координат полюса СхПР в абсолютній системі координат:

$$p_{xyz} = T_N^0 \cdot p_{uvw}. \quad (4)$$

При цьому елементи матриці елементарних похибок зчленувань додаються до елементів матриць, що описують елементарні перетворення положення кожного зчленування. Вираз (5) з врахуванням (2) та (3) приймає вигляд:

$$P_{xyz} = \left(\prod_{i=1}^n (T_{n-1}^n + \Delta_{j_{n-1}}^n) \right) \cdot P_{uvw}. \quad (5)$$

Для прикладу розглянуто ПР мод. IRB 4600-20/2.50 виробництва компанії АВВ (Швейцарія) вантажопід'ємністю до 20 кг. МС даного ПР антропоморфна, має 6 ступенів рухомості, всі узагальнені координати (УК) є обертальними, система координат ПР – ангулярна. За технічними характеристиками ПР побудована математична модель, що враховує похибки відпрацювання переміщень в кожному зчленуванні, в загальному вигляді представлена виразом:

$$P_{C_{x_i}} = F \left((f_1(\theta_{0_i}^1) + f_2(\Delta_{j_{0_i}}^1)) \times (f_1(\theta_{1_i}^2) + f_2(\Delta_{j_{1_i}}^2)) \times \dots \times (f_1(\theta_{n-1_i}^n) + f_2(\Delta_{j_{n-1_i}}^n)) \right), \quad (6)$$

де $\theta_{n-1_i}^n$ – значення УК в зчленуваннях пари $(n - (n - 1))$ ланок МС ПР; $\Delta_{j_{n-1_i}}^n$ – масив значень похибок (7) в зчленуваннях n -ої та $(n - 1)$ -ої ланок МС ПР:

$$\Delta_{j_{n-1_i}}^n = \left[\left\{ \varepsilon_{A_{k_i}}^n \mid k_i = \overline{1, K_i} \right\}, \left\{ \varepsilon_{B_{k_i}}^n \mid k_i = \overline{1, K_i} \right\}, \left\{ \varepsilon_{C_{k_i}}^n \mid k_i = \overline{1, K_i} \right\}, \left\{ \delta_{X_{k_i}}^n \mid k_i = \overline{1, K_i} \right\}, \left\{ \delta_{Y_{k_i}}^n \mid k_i = \overline{1, K_i} \right\}, \left\{ \delta_{Z_{k_i}}^n \mid k_i = \overline{1, K_i} \right\} \right]^T, \quad (7)$$

де n – номер ланки МС ПР; K – загальна кількість k_i -их послідовних переміщень СхПР в i -ту точку РЗ ПР; $\varepsilon_{A_{k_i}}^n$, $\varepsilon_{B_{k_i}}^n$, $\varepsilon_{C_{k_i}}^n$ та $\delta_{X_{k_i}}^n$, $\delta_{Y_{k_i}}^n$, $\delta_{Z_{k_i}}^n$ – відповідно кутові та лінійні складові загальної похибки, обумовлені переміщеннями n -ої ланки МС ПР навколо та/або вздовж відповідних осей $X_{ПР}$, $Y_{ПР}$, $Z_{ПР}$ СК ПР.

Графічна інтерпретація виконаного процесу моделювання величин похибок позиціонування СхПР мод. IRB 4600-20/2.50 з врахуванням похибок в зчленуваннях ланок представлена на рис. 1.

Вказаний процес моделювання виконано в два етапи. Перший етап полягає у визначенні координат положення полюса СхПР в РЗ ПР в ідеальному випадку, без врахування похибок в зчленуваннях ланок, які виникають при виконанні переміщень відповідних привідних елементів активних ланок із числа активованих МС ПР. Другим етапом моделювання є визначення величин похибок в попередньо визначеній певній точці РЗ ПР при K_i переміщеннях Сх в дану i -ту точку. В результаті багаторазового переміщення в конкретну точку РЗ сформована вибірка (масив) із значень фактичних координат полюса СхПР.

Для вирішення прямої задачі кінематики для характеристичної точки МС ПР, в даному випадку полюса ($P_{C_{x_i}}$) СхПР в абсолютній системі координат ПР $X_{ПР}Y_{ПР}Z_{ПР}$, що покладена в основу визначення фактичного положення СхПР при моделюванні, використано формалізований опис МС ПР з використанням теорії кватерніонів [36, 38].

Зміст процесу моделювання полягає у визначенні координат положення полюса СхПР мод. IRB 4600-20/2.50 в певній i -ій точці робочого простору як функції від УК, які задаються системою керування ПР $P_{C_{x_i}} = f(\theta_1 = B_i, \theta_2 = C_{1_i}, \theta_3 = C_{2_i}, \theta_4 = A_{1_i}, \theta_5 = C_{3_i}, \theta_6 = A_{2_i})$, де $\theta_{1...6_i}$ в залежності від конкретної кінематичної структури МС ПР може приймати значення величин лінійних (X , Y , Z) та/або кутових (A , B , C) переміщень відповідних ланок. Моделювання багаторазового переміщення в точку $P_{C_{x_i}}$ досягається шляхом додавання величини похибки до заданого значення УК в кожному зчленуванні ланок за виразом (5). Таким чином формуються багатомірні масиви розмірністю $4 \times 4 \times K_i$, де K_i – кількість “сторінок” багатомірного масиву, що дорівнює кількості переміщень Сх в i -ту точку РЗ ПР. Операції множення та додавання багатомірних масивів виконуються «посторінково» аналогічно матричним. З врахуванням сказаного вище координати положення полюса СхПР в i -ій точці РЗ ПР при k -му переміщенні можна розглядати як функцію двох змінних: елементарних похибок в зчленуваннях ланок МС ($\Delta_{j_{k_i}}$) та їх УК $\theta_{1...6_i}$, тобто

$$P_{C_{x_i}} = f(\theta_{(1...6)_i}, \Delta_{j_{(1...6)_i k}}).$$

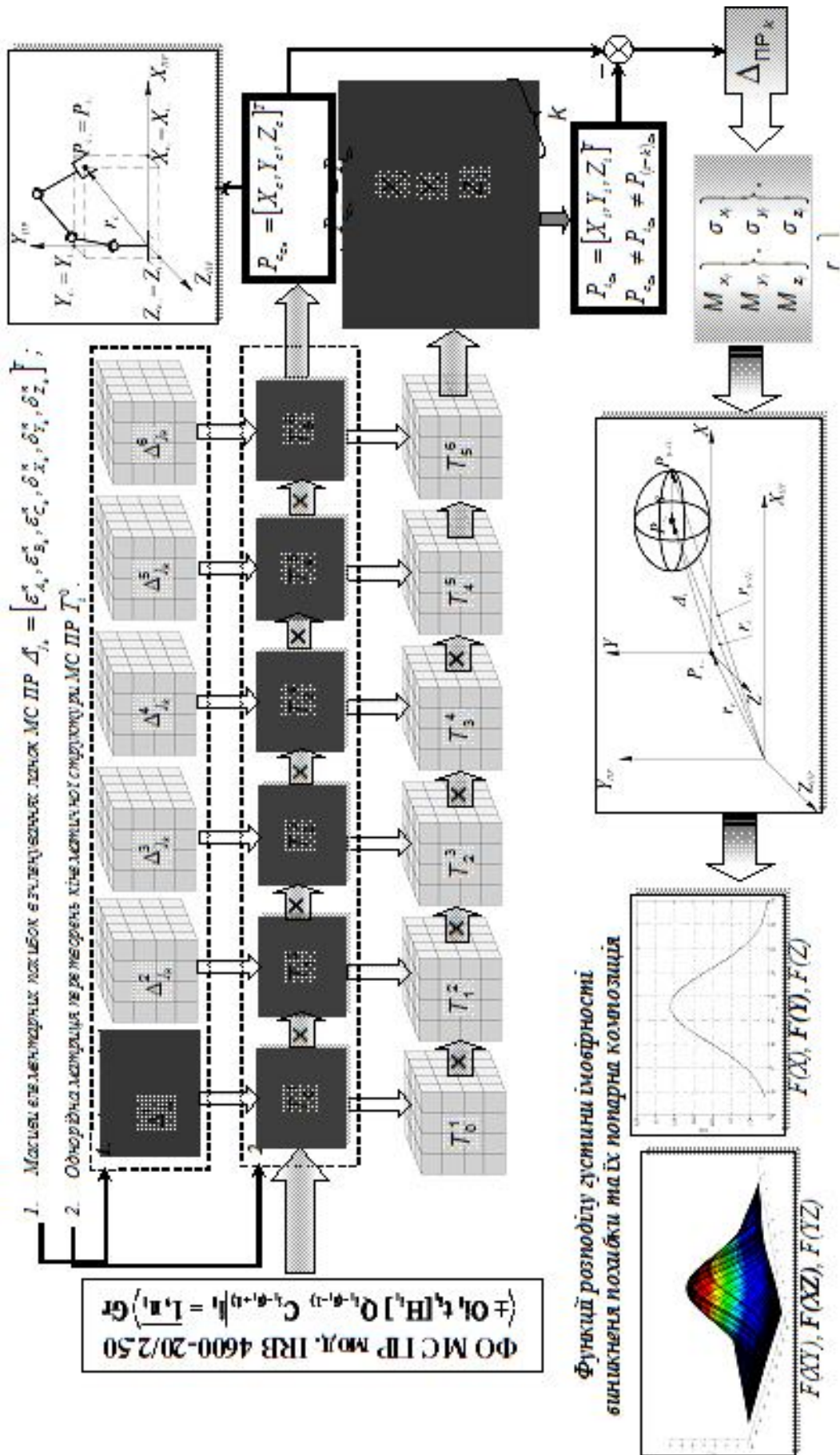


Рисунок 1 – Графічна інтерпретація процесу моделювання величин похибок позионування Сх в конкретній точці РЗ ПР мод. IRB 4600-20/2.50

Очевидно, що координати полюса СхПР при кожному переміщенні в i -ту точку РЗ ПР відрізняються від заданих системою керування на величину похибки позиціонування.

Загальну похибку позиціонування можна розрахувати як різницю координат заданого та фактичного положення полюса СхПР:

$$\Delta_{C_{x_i}} = P_{c_{C_{x_i}}} - P_{C_{x_i}}. \quad (8)$$

Для кожного k -го переміщення в i -ту точку РЗ ПР координати положення СхПР будуть різними, що дає можливість сформулювати статистичну вибірку щодо точності (похибки) позиціонування Сх.

Пропонований комбінований підхід найбільш точно відтворює випадковий характер прояву негативних факторів, що впливають на точність відпрацювання заданих системою керування ПР УК в зчленуваннях, і як наслідок – відхилення полюса СхПР від запрограмованого положення в РЗ ПР та дозволяє досліджувати величину похибки позиціонування полюса СхПР в РЗ як функцію від УК зчленувань ланок МС ПР в різних точках РЗ.

Виконано моделювання переміщення СхПР мод. IRB 4600-20/2.50 в довільну точку $P_{C_{x_i}}$ з координатами $P_{C_{x_i}} = [(X_{C_i}^{IPP} = 2293,3); (Y_{C_i}^{IPP} = 108); (Z_{C_i}^{IPP} = 494,7)]^T$. Отримані значення фактичних координат положення СхПР при $K = 100$ переміщеннях в задану точку РЗ ПР, представлені у вигляді статистичної вибірки. Проведено аналіз отриманих статистичних даних, розраховані похибки позиціонування СхПР в точці $P_{C_{x_i}}$. Із розрахованих значень Δ_{C_x} сформована статистична вибірка похибок позиціонування.

На підставі статистичної інформації щодо появи та величини похибок позиціонування та похибок повторюваності складаємо загальна функція розподілу імовірності за відомими елементарними функціями по кожній координаті 3D-простору X, Y, Z за умови їх незалежності.

Вважається, що похибки ПР є випадковими величинами, розподіляються за нормальним законом [9, 11, 20-22, 29] та є незалежними [9, 19-21, 29, 34]. Вказане в загальному випадку не є строгим та однозначним, оскільки закон розподілу випадкової величини, тобто похибки позиціонування СхПР, апіорі невідомий. Тому при комбінованому підході до моделювання та подальшої атестації РЗ ПР приймається, що похибки розподілені за невідомим законом розподілу в межах інтервалу $[+\Delta_{j_{n-1}}^n \dots -\Delta_{j_{n-1}}^n]$, де Δ_j – позначення похибки в зчленуванні $(n - (n - 1))$ ланок МС ПР (де j – від англ. *joint* – з'єднання) для кожного зчленування; n – порядковий номер ланки.

В результаті досліджень визначено, що вибірки фактичних координат положень СхПР не є корельованими, отже композиція функцій щільності розподілу похибок в 3D-просторі за всіма трьома координатами являє собою добуток окремих функцій щільності розподілу ймовірності за координатами X, Y, Z [39, 40]:

$$f(x_i, y_i, z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 2\pi \cdot \sigma_{x_i} \cdot \sigma_{y_i} \cdot \sigma_{z_i}} \cdot e^{-\frac{(x_i - m_{x_i})}{2 \cdot \sigma_{x_i}^2} - \frac{(y_i - m_{y_i})}{2 \cdot \sigma_{y_i}^2} - \frac{(z_i - m_{z_i})}{2 \cdot \sigma_{z_i}^2}}. \quad (9)$$

Аналіз рухів встановлення ПР та площин, в яких відбуваються технологічні переходи завантаження/розвантаження ТО, похибками, що виникають вздовж вісі встановлення ОМ в ПрРП, дозволяє гіпотетично стверджувати, що у випадку завантаження ПрРП, що розташоване в площині $Y_{\text{ПР}}OZ_{\text{ПР}}$, об'єктом маніпулювання (ОМ) з його (ОМ) базуванням з упором в торець високої точності вздовж вісі встановлення $X_{\text{ПР}}$ не вимагається [23]. Тому для даних умов особливу увагу слід приділяти похибкам, що виникають за осями, перпендикулярними вісі встановлення, тобто $Y_{\text{ПР}}$ та $Z_{\text{ПР}}$.

Аналогічно вказане можна застосувати в тому випадку, коли ПрРП_t розташоване в площині $X_{Пр}OZ_{Пр}$ та встановлення $OM_{t-1}^{d_g}$ виконується вздовж вісі $Y_{Пр}$. Вказане дозволяє спростити вираз (9) для полегшення графічного представлення функції щільності розподілу в площині встановлення $OM_{t-1}^{d_g}$ в ПрРП_t та аналізу похибок для пар координат $X_{Пр}, Y_{Пр}, Z_{Пр}$. В цьому випадку наведений для пари координат $X_{Пр}, Y_{Пр}$ вираз (9) для вказаних комбінацій похибок $Y_{Пр}, Z_{Пр}$ прийме аналогічний вигляд:

$$f(x_i, y_i) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_{x_i} \cdot \sigma_{y_i}} \cdot e^{-\frac{(x_i - m_{x_i})^2}{2 \cdot \sigma_{x_i}^2} - \frac{(y_i - m_{y_i})^2}{2 \cdot \sigma_{y_i}^2}} \quad (10)$$

Оскільки похибки Пр поширені в 3D просторі, то для більш повного та комплексного уявлення про закони щільності розподілу імовірності необхідно виконати композицію (10) цих законів. Вказане графічно представляється на рис. 2 законом щільності розподілу імовірності системи випадкових величин (похибок позиціонування СхПр) в просторі РЗ Пр.

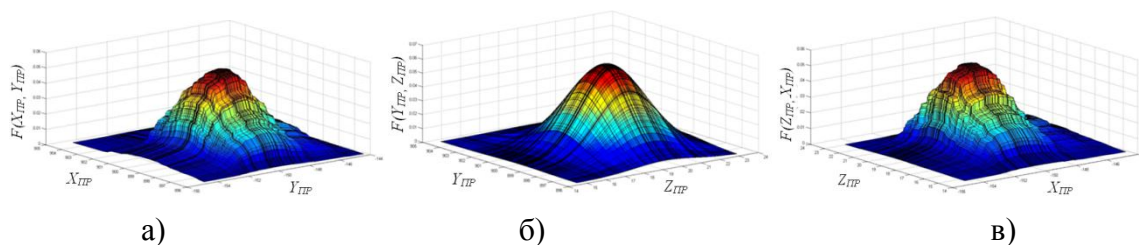


Рисунок 2 – Графічне представлення композиції законів щільності розподілу системи похибок за координатами: а) $X_{Пр}Y_{Пр}$; б) $Y_{Пр}Z_{Пр}$; в) $X_{Пр}Z_{Пр}$

Аналогічні дослідження проведені для 120 точок зовнішнього і внутрішнього контурів РЗ Пр в площині $X_{Пр}OY_{Пр}$. Інформація про величини похибок в кожній конкретній точці РЗ Пр та отримані статистичні дані дають змогу оцінити величину похибки позиціонування, розподіл похибок в межах РЗ та провести аналіз отриманих даних. Отримані атестаційні дані для аналізованого Пр мод. IRB 4600-20/2.50, що має за паспортом точність позиціонування $S_{\Delta Cx} = \pm 0,8$ мм, вказують на те, що інтервал зміни точності становить $[\Delta_{Cx_{min}}; \Delta_{Cx_{max}}] = [0,1; 2,7]$ мм. Таким чином, точність позиціонування СхПр в різних точках РЗ при різних УК відрізняється на порядок, що підтверджується дослідженнями інших авторів [9, 16, 17, 19-21].

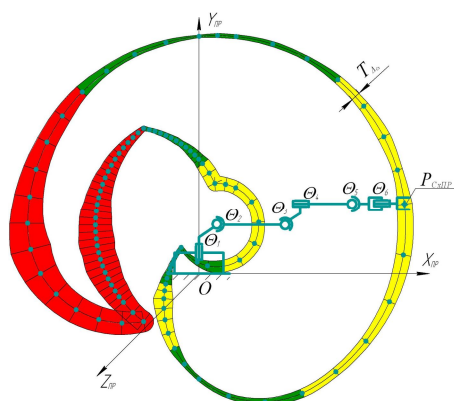


Рисунок 3 – Результат програмної атестації РЗ Пр на прикладі Пр мод. IRB 4600-20/2.50, $\Delta_{Пр} = \pm 0,8$ мм:

- (зелений) – сектор підвищеної точності $T_{\Delta Cx} < 0,8$ мм;
- (жовтий) – сектор нормальної точності $\Delta_{Cx} = [+0,8; -0,8]$, $T_{\Delta Cx} = 1,6$ мм;
- (червоний) – сектор недостатньої точності $T_{\Delta Cx} > 1,6$ мм

Отриманий інтервал зміни щодо точності доцільно поділити на сектори, що мають інтервали точностей, що дорівнюють «полю допуску» похибки $T_{\Delta_{cx}} = 1,6 \text{ мм} = [+ 0,8; - 0,8]$, який відповідає паспортному і тому названо сектором нормальної точності, або більшу точність – сектор підвищеної точності $[0,1; 0,8)$ та сектор недостатньої точності $(1,6; 2,7]$. При цьому середня точність позиціонування становить $\pm 0,76 \text{ мм}$, що відповідає точності позиціонування за паспортом даного ПР.

Отримані атестаційні дані для внутрішнього та зовнішнього контурів одного з вертикальних перетинів РЗ ПР мод. IRB 4600-20/2.50, що графічно проілюстровані на рис. 3, можуть бути використані надалі для вирішення задач, пов'язаних з вибором та розміщенням технологічного обладнання в межах РЗ ПР за показником точності.

В процесі вказаних досліджень спостерігались тенденції щодо залежності величини похибки позиціонування СхПР від УК в зчленуваннях ланок та конфігураційного стану МС. На підставі того, що похибка позиціонування СхПР є векторною величиною $[10, 21, 23, 25, 29, 30]$ та напрямком її (похибки) вектору залежить від векторів кутових та/або лінійних переміщень кожного зчленування і співпадає з напрямком руху ланки $[18, 19, 21, 29]$ можна сформулювати гіпотезу про те, що імовірність взаємної компенсації похибок в зчленуваннях МС ПР більша у випадку різнонаправлених переміщень суміжних ланок МС ПР, а імовірність взаємного накладання похибок в зчленуваннях більша у випадку їх однонаправлених переміщень.

Висновок. Запропонований комбінований підхід до точнісної програмної атестації РЗ ПР дозволяє розглядати абсолютні значення похибок, що, як правило, вказуються виробниками ПР, з імовірнісних позицій та використовувати статистичні методи аналізу точності точок РЗ ПР. Проведена на базі комбінованого підходу точнісна програмна атестація внутрішнього та зовнішнього контурів РЗ аналізованого ПР мод. IRB 4600-20/2.50 дозволила встановити сектори підвищеної, нормальної та недостатньої точності. Вказана градація на сектори точності виконана з врахуванням та порівнянням паспортної точності позиціонування СхПР і дає підстави для генерування рекомендацій щодо розміщення технологічного обладнання в межах РЗ ПР за критерієм точності його (обладнання) технологічного обслуговування ПР. Очевидна економія часових, енергетичних та економічних ресурсів при комбінованому підході до точнісної програмної атестації РЗ ПР є найвагомішою перевагою запропонованого підходу.

Напрямки подальших досліджень. Перевірити істинність вказаних гіпотетичних тверджень методом моделювання ПР інших конструктивних виконань, включаючи ПР з кінематично збитковими МС. Визначити умови доцільності використання вузла адаптації $[33, 37]$ для апаратно-програмної компенсації похибок позиціонування СхПР при завантаженні-розвантаженні РП механоскладальних ГВК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кобринский А. А. Мобильность и точность манипулятора / А. А. Кобринский, Л. А. Кобринский // *Машиноведение*. – 1976. – № 3. – С. 3-9.
2. Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений : ГОСТ 11.002-73. – [чинний від 1973-01-01] – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 26 с.
3. Сварочные работы / [Геттерт В., Герден Г., Гюттнер Х. и др.]; под ред. Г. Гердена; пер. с нем. Г. Н. Клебанова, Д. Г. Тесменецкого. – М. : Машиностроение, 1988. – 288 с.
4. Kleinkes M. An automated quick accuracy and output signal check for industrial robots / M. Kleinkes, W. Neddermeyer, M. Schnell // *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology*. – Hangzhou, China, April 16-18, 2006. – P. 232-237.
5. Kurfess T. R. A multivariate statistical approach to metrology / T. R. Kurfess,

- D. L. Banks, J. J. Wolfson. – ASME J. Manuf. Sci. Eng. – 1996. – vol. 118, no. 1. – P. 652-657.
6. Manipulating industrial robots. Performance criteria and related test methods: ISO 9283:1998. – [Чинний від 1998-08-05]. – Geneve : International Organization for Standardization, 1998. – 72 p.
7. Taslakova D. Positioning accuracy and repeatability of a class of technological robots / Daniela Taslakova // Bulgarian academy of science. Problems of engineering cybernetics and robotics. – 1997. – № 46. – P. 99-105.
8. Robotic Gripper Repeatability Definition and Measurement / Samuel Bouchard. – 08.07.2011. – Режим доступу до ресурсу: <http://blog.robotiq.com/bid/36551/Robotic-Gripper-Repeatability-Definition-and-Measurement>.
9. Siciliano B. Handbook of robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin : Springer-Verlag, 2008. – 1628 p.
10. Корендясев А. И. Теоретические основы робототехники / А. И. Корендясев, Б. Л. Саламандра, С. М. Тывес; отв.ред. С. М. Каплунов; Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. – М. : Наука, 2006. – Кн. 1, 2.
11. Kurfess T. R. Robotics and automation handbook / Thomas R. Kurfess. – CRC Press LLC, 2005. – 579 p.
12. Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability: ISO 3534-1:2006 [Чинний від 2006]. – Geneve : International Organization for Standardization, 2006. – 105 p.
13. Duysinx P. An introduction to robotics: mechanical aspects / Pierre Duysinx, Michel Geradin. – University of Liège, 2004. – 247 p.
14. Maas H-G. Dynamic Photogrammetric Calibration of Industrial Robots / Hans-Gerd Maas // Proc. SPIE Videometrics V. SPIE Proceedings Series Vol. 3174, – Switzerland, Zurich. – 1997. – Режим доступу до ресурсу: http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ_maas/videometrics97_robotocal.pdf
15. Mechanical Engineering Handbook [Lewis L. F., Fitzgerald J. M., Walker I. D., Cutkosky M. R., Lee Kok-Meng, Bailey R., Zhou Ch., Priest J. W., Stevens G. T., Liu Kai]; Ed. Frank Kreith. – Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. – 115 p.
16. Жавнер В. Л. Сравнительный анализ кинематических схем промышленных роботов и манипуляторов по точности позиционирования / В. Л. Жавнер, И. В. Трояновский // Интенсификация процессов и оборудования пищевых производств. – Л., 1976. – С. 66-69.
17. Иовлев В. Ю. Исследование влияния конфигурации манипулятора на ошибки позиционирования схвата / В. Ю. Иовлев, А. Н. Коршунов, О. В. Корытко и др. // Робототехника. – Л. :ЛПИ, 1979. – С. 57-64.
18. Никифоров С. О. Точностные модели промышленных роботов / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев // Вестник машиностроения. – 1989. – № 9. – С. 22-25.
19. Никифоров С. О. Влияние метрики манипулятора на погрешности позиционирования промышленных роботов / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев // Вестник машиностроения. – 1991. – № 8. – С. 29.
20. Lenarcic J. Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design. / J. Lenarcic, P. Wenger. – Berlin : Springer-Verlag, 2008. – 466 p.
21. Никифоров С. О. Вероятностная оптимизация конфигурации манипулятора для заданного конечного положения захватного устройства / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев // Вестник машиностроения. – 1988. – № 4. – С. 7-8
22. Павленко І. І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування [навчальний посібник] / І. І. Павленко. – Кіровоград, 2007. – 418 с.
23. Аннаби М. Х. Приближенный метод расчета погрешностей отработки роботами программных траекторий: дис. канд. техн. наук: 05.02.02 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы» / Аннаби Мохамед Хабиб. – СПб., 2003. – 126 с.
24. Белаиди А. Разработка и исследование методов компенсации систематических

погрешностей промышленных роботов : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.05 «Роботы, манипуляторы и робототехнические системы» / Абдеррахман Белаиди – Л., 1989. – 16 с.

25. Волгарев А. Л. Улучшение динамических и точностных характеристик промышленного робота с ЭВМ в контуре управления в режимах движения на малых скоростях: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.05 «Роботы, манипуляторы и робототехнические системы» / А. Л. Волгарев. – Л., 1989. – 16 с.

26. Воробьев Е. И. Матричный метод определения точностных характеристик механизмов роботов и манипуляторов / Е. И. Воробьев // Сборник научно-методических статей по теории машин и механизмов. – М. : Высшая школа, 1979. – Вып. 9. – С. 45-48.

27. Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління: Підручник / [Л. С. Ямпольський, П. П. Мельничук, Б. Б. Самотокін, М. М. Поліщук, та ін.]. – Житомир : ЖДГУ, 2005. – 680 с.

28. Лилов Л. Анализ точности манипуляционных систем / Л. Лилов, П. Парушев, Б. Бекяров // Теоретична и приложна механика. – Болгария. – 1981 – № 4 – С. 11-19.

29. Мархадаев Б. Е. Комбинированные математические модели при анализе точности манипуляционных роботов: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.02.05 / Б. Е. Мархадаев. – СПб, 1998. – 20 с.

30. Технологія автоматизованого виробництва: [підручник] / О. О. Жолобов, В. А. Кирилович, П. П. Мельничук, В. А. Яновський. – Житомир : ЖДГУ, 2008. – 1014 с.

31. Ягліньський В. П. Моделювання динамічних процесів роботизованого виробництва / В. П. Ягліньський, Д. В. Іоргачов. – Одеса : Астропринт, 2004. – 234 с.

32. Ибрагим А. Р. Повышение точности устройств автоматической смены зажимных элементов в токарном модуле: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / Ибрагим Фархан Салман Аль Рефо. – К. : НТУУ «КПИ», 2002. – 168 с.

33. Патент на корисну модель 58988 Україна, МПК В 25 J 15/00. Очутливлений кистьовий суглоб маніпулятора промислового робота / Кирилович В. А., Сазонов А. Ю. ; заявник та патентовласник: Житомирський державний технологічний університет – № U201013982; заявл. 23.11.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.

34. Скворцов А. В. Основы технологии автоматизированных машиностроительных производств: учебник / А. В. Скворцов, А. Г. Схиртладзе. – М. : Высш. шк., 2010. – 589 с.

35. Бурдаков С. Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: [учебн. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. «Робототехнические системы»] / С. Ф. Бурдаков, В. А. Дьяченко, А. Н. Тимофеев – М. : Высш. шк., 1986. – 264 с.

36. Кирилович В. А. Формування функціональних моделей маніпуляційних систем промислових роботів / В. А. Кирилович, П. П. Мельничук, О. О. Писарчук, І. Ю. Черепанська // Міжнародний збірник наукових праць «Прогресивні технології і системи машинобудування» – Донецьк : ДонНТУ, 2011. – Вип. № 42. – С. 118-124.

37. Kyrylovych V. Unit of adaptation grippers of industrial robots / V. Kyrylovych, A. Sazonov // Poland, Rzeszow. – Mechanika z. 81. – 2010. – P. 15-17.

38. Ватульян А. О. Кватернионы // Соросовский образовательный журнал. – Соросов. – 1999. – № 5. – С. 117-120.

39. Елисеєва І. І. Общая теория статистики: учебник / Под ред. И. И. Елисеевой. / И. И. Елисеєва, М. М. Юзбашев – М. : Финансы и статистика, 2004. – 656 с.

40. Михайленко В. В. Теорія ймовірностей, математична статистика та випадкові функції : Курс лекцій [навчальний посібник] / Михайленко В. В. – Житомир : ЖІТІ, 2003. – 292 с.

Кирилович В.А., Сазонов А.Ю., Самотокин Б.Б., Черепанская И.Ю., Орлюк Е.И.
КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ТОЧНОСТНОЙ АТЕСТАЦИИ РАБОЧИХ ЗОН
ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Проведено анализ основных точностных характеристик и существующих методов моделирования рабочих зон промышленных роботов. По результатам анализа предложено комбинированный подход к точностной аттестации рабочих зон промышленных роботов, проверена и подтверждена его работоспособность. На основании результатов исследований определено зависимость погрешности позиционирования схвата промышленного робота от конфигурационного состояния звеньев его манипуляционной системы.

Ключевые слова: точность позиционирования, погрешность позиционирования, позиционная повторяемость, промышленный робот.

Kyrylovych V., Sazonov A., Samotokin B., Cherepanska I., Orlyuk E. COMBINED APPROACH FOR THE WORKING ENVIRONMENT ACCURACY'S EXAMINATION.

It was analyzed of the accuracy characteristics and the existing methods of the industrial robots' working environment simulation. Based on the analysis results the combined approach for the working environment accuracy's examination was proposed, its working capability was verified and confirmed. Based on the investigation's results the industrial robot's gripper positioning error dependency on the manipulation systems links' configurational state was determined.

Keywords: pose accuracy, positioning error, pose repeatability, industrial robot.